

## 夜間の電離層吸収

### III. 夜間電離層に入射する中短波電波の通路と吸収

若井 登\*

HF Radio Wave Absorption in the Nighttime  
Part III. Ray Paths and Absorption of MF and HF Radio  
Waves Incident at the Nighttime Ionosphere

Noboru WAKAI\*

**Abstract:** Computations of the ray path and absorption of radio waves by means of the ray-tracing technique are applied to the oblique propagation of MF and HF waves passing through model ionospheres in the nighttime under different conditions.

The field intensity deduced from those computed results is discussed in comparison with that measured on board the ship of the Japanese Antarctic Research Expeditions as already reported in Parts I and II of this paper.

It is confirmed quantitatively to a certain degree that the ionization in the nighttime E region is responsible for the absorption of MF and lower HF waves.

#### 1. 緒 論

前の2つの論文、第I部（若井・大瀬・田之畑，1971）および第II部（若井・藤井・宮本，1971）において、南極観測船上短波電界強度測定によって得られた、夜間の電離層吸収の諸特性と、それが太陽活動の変化に伴って受ける影響、ならびに使用測定器の概略をのべた。

本文においては、夜間 E 層が中波および短波電波の伝搬に果す役割に関して、典型的な3つのモデル電離層に種々の入射角で入射する、異なる周波数の電波の通路と吸収量を計算した結果を記述する。そしてその計算結果と、南極観測船上観測による電界強度測定値とを比較検討する。

#### 2. 電波通路と電離層吸収の計算

中波以上の周波数をもつ電波の電離層中の伝搬を扱うにあたっては、スボラディック E 層または不規則電離雲のような、局部的に電離傾度の大きい領域を除いて、一般に電離層電子密度の波長に対する変化の度合は小さいので、媒質は一樣とみなすことができ、したがって、

\* 電波研究所平磯支所. Hiraiso Branch, Radio Research Laboratories, Nakaminato-shi, Ibaraki.

ray theory が適用できる。

中短波の遠距離（ここでは空間波が主体となる領域とする）伝搬において、受信点での電界強度を決定するためには、電波通路と媒質中でうける吸収を求める必要がある。しかし、実際問題としては、複雑な電離層の特性をすべて包含して計算することは不可能であって、従来は実用に支障のない程度の電界強度算定法が種々工夫され、用いられてきた。最近電子計算機の利用によって、経験的方法によってではなく、ある程度忠実に電波エネルギーの流れを追跡できるようになった。

本文での計算は、基本的には HASELGROVE (1954) 法を用い、それを JONES (1966) が電子計算機用に開発した ray-tracing 技術によるものであり、ESSA (Environmental Science Services Administration, 現在は National Oceanic and Atmospheric Administration に統合された) の電子計算機 CDC-3600 を用いて行なわれた。

計算の内容を要約すると次のようになる。

## 2.1. 周波数

0.5, 0.75, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 4.0, 5.0, 7.5 MHz の10周波数。ただし発射角  $90^\circ$  すなわち垂直打上げの場合には、150~490kHzの間は20kHz刻みの18周波数、550~1000 kHzの間は50 kHz刻みの10周波数、1.1~2.0 MHzの間は100 kHz刻みの10周波数、2.2~3.0 MHzの間は200 kHz刻みの5周波数、3.5~5.0 MHzの間は500 kHz刻みの4周波数、合計47周波数で ray-tracing を行なった。

## 2.2. 発射角

$0^\circ$  から  $10^\circ$  おきに  $90^\circ$  までの10の発射仰角。

## 2.3. 電子密度分布

図1に示すような3つの夜間の電子密度分布 ( $N(h)$  プロファイル) を用いた。これらは地上からの電波打上げ観測をもとに、層と層の間の谷間の補正を行なって、計算により求めた (WAKAI, 1967) プロファイルである。1960年4月21日00時00分 L.T. のプロファイル (プロファイル Q とする) は静穏な状態の例であって、E 層と F 層の間は深い電離の谷を形成している。1958年2月20日00時30分 L.T. の例は、中程度の地磁気嵐の進行中における  $N(h)$  プロファイル (プロファイル M とする) であり、150 km 付近にピークをもつ中間層の出現していることが特徴的である。1960年4月29日00時00分 L.T. の例は、大きなじょう乱時におけるプロファイル (プロファイル D とする) であって、中間層を含めて E 領域全体の電離が低い高度に形成されている。これらのプロファイルは、Boulder ( $40^\circ 00'$

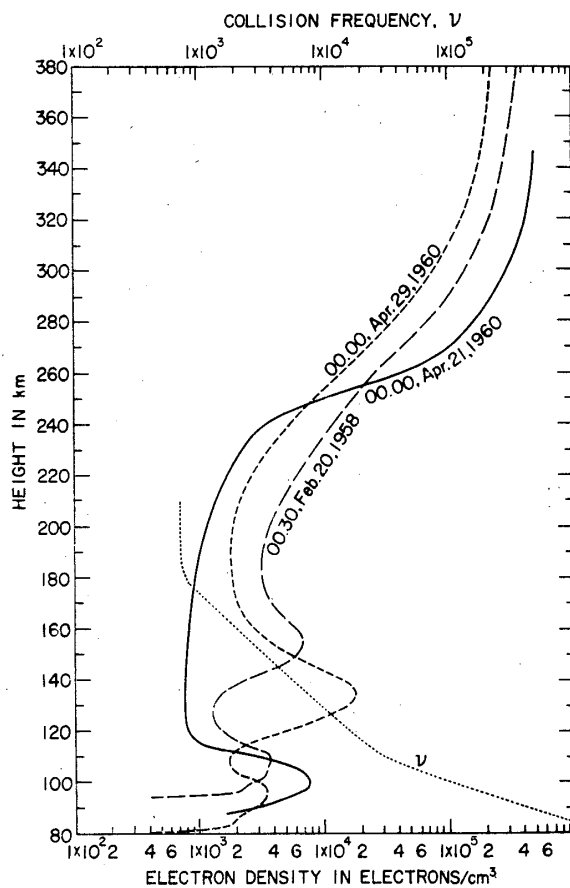


図 1 Ray-tracingに用いた3つの夜間の電子密度分布 (プロファイル Q...00h00m, Apr. 21, 1960; プロファイル M...00h30m, Feb. 20, 1958; プロファイル D...00h00m, Apr. 29, 1960) と電子衝突回数  $\nu$  の高度分布

N, 105°18'W) で得られたものであるから, 後述の計算結果は中緯度に対して適用できるものと考えられる.

#### 2.4. 衝突回数分布

電波がうける吸収を計算するには, 電子衝突回数の高度分布を与えなければならない. 図 1 中に示した衝突回数  $\nu$  の分布は, 従来の観測事実を考慮して定めた分布であって, これを計算に用いた.

#### 2.5. 地球磁場変化

地球中心においた磁気双極子による磁場の高度に対する変化を, 地点として, 電子密度分布の観測点である Boulder を与えて計算した.

本文のような斜入射伝搬においては, 電波反射点の位置は投射角によって変化するので, 上述 2.3., 2.4., 2.5. の諸量は厳密には各反射点によって異なる値を与えるべきであるが, 本文ではこれらの諸量は水平方向に一様と仮定した.

計算結果として次の諸量が打ち出される．

- (1) Ray の反射の高さ
- (2) 地表距離
- (3) Ray の横方向の偏移
- (4) Ray の仰角
- (5) 群通路長
- (6) 位相通路長
- (7) 吸収量

### 3. 計 算 結 果

#### 3.1. 電波通路

電波通路の計算結果の全部を示すことは別の論文 (WAKAI, 1971) にゆずり、ここでは、1.0, 2.5, 5.0 MHz の3つの周波数についてのみ図示する．その理由は、1 MHz では夜間 E 層の電子密度により敏感に伝搬モードが左右される点で特徴的であり、2.5 と 5.0 MHz の結果は南極観測船上観測データとの比較検討が容易であるからである．

前述の3つの電子密度プロファイルに電波が入射した時の通路を、発射仰角 ( $0^\circ$  から  $80^\circ$  までを図示) をパラメーターとして、反射高と地表距離との関係において、図2に示した．ただし地球を平面として作図してあるので、 $0^\circ$  で発射された ray も横軸とある角度をなしており、また電離層中での ray の屈曲を省略して反射点での折れ線で通路を近似して作図してある．右上隅に使用した  $N(h)$  プロファイルを示した．

先ず図2(a)の静穏電離層 (プロファイル Q) に対する電波通路についてのべる．1 MHz では仰角  $50^\circ$  までは E 層、 $60^\circ$  以上は F 層反射、2.5 MHz では  $10^\circ$  まで E 層、 $20^\circ$  以上は F 層反射、5 MHz では全部が F 層反射モードになる．すなわちよく知られているように、与えられた最大電子密度に対して、E から F への伝搬モードの移り変りは、周波数により異なる発射仰角で起こる．一般に仰角を増すと地表距離は小さくなるが、伝搬モードの移り変りに際して地表距離ののびることが見られる．

しかし図2(b) (プロファイル M) および図2(c) (プロファイル D) のように、中間層を含む電離層に電波が入射した時には、E 層から F 層反射への移り変りの途中に、仰角によっては中間層反射が生じ、地表距離の変化はそれぞれの場合において異なる様相を示している．図2(c) の 5 MHz においては、仰角  $60^\circ$  以上の電波は F 層を突き抜けるので図示し

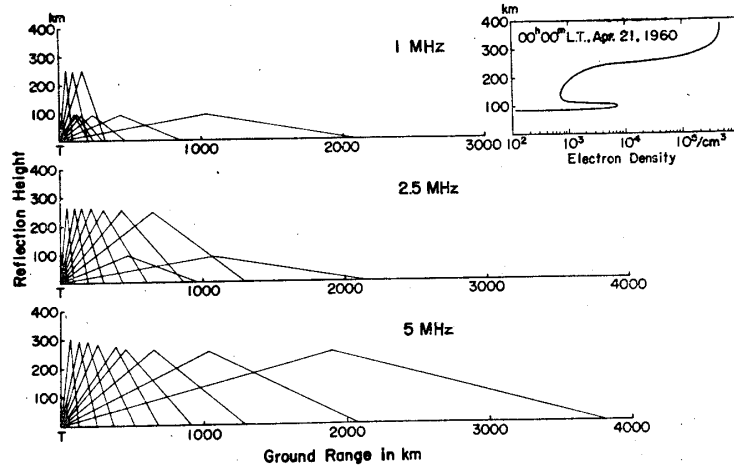


図 2 (a) プロファイル Q に対して計算した 1, 2.5, 5 MHz 電波の通路  
(発射仰角  $0^\circ$  から  $80^\circ$  まで  $10^\circ$  おき)

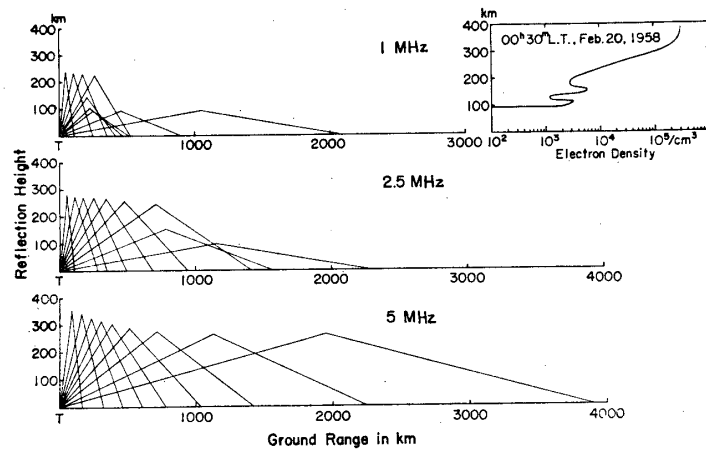


図 2 (b) プロファイル M に対して計算した 1, 2.5, 5 MHz 電波の通路  
(発射仰角  $0^\circ$  から  $80^\circ$  まで  $10^\circ$  おき)

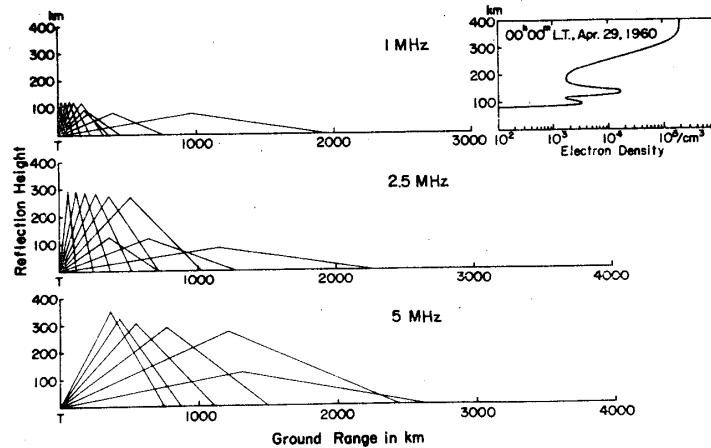


図 2 (c) プロファイル D に対して計算した 1, 2.5, 5 MHz 電波の通路  
(発射仰角  $0^\circ$  から  $80^\circ$  まで  $10^\circ$  おき, ただし 5 MHz は  $50^\circ$  まで)

ていない。

ここでは反射高だけから、 $10^\circ$  おきの伝搬モードの変化を説明したが、後述する吸収量（図3参照）もあわせて考慮すると、かなり正確に伝搬モード変化が起こる仰角を補間により求めることができる。

第I部の電界強度計算において、夜間の伝搬を扱う場合には、5 MHz ではF層モード、2.5 MHz においても低仰角発射の場合以外はF層モードを仮定してさしつかえないとのべたが、このことは図2によって裏付けられているといえることができる。

### 3.2. 電離層吸収

図3に、周波数と発射仰角を与えて計算した電離層吸収量  $L_i$  (dB) を示す。図の(a), (b), (c)は電波通路を示した図2同様、それぞれ3つのプロファイルQ, M, Dに対応する。図のように同一仰角の  $L_i$  を結んで得られる曲線は、周波数を変えながら一定仰角で電波を発射したと考えた時の電波がうける吸収の変化をあらわしている。作図にあたって計算点の数は、必ずしも図のような滑らかな曲線を描けるほど充分に多くはない。しかし仰角  $90^\circ$  の場合は前述したように、0.5~5 MHz の間で約30の周波数について吸収を計算したので、かなり精密に吸収変化曲線を描くことができる。その上吸収変化の大きい反射モードの移り変りの部分は、等価臨界周波数を計算して曲線を補うことができる。さらに反射高の情報も加味して図3を作図した。

図3(a)について説明する。仰角  $90^\circ$  の曲線は、臨界周波数520 kHzにあるE層下部の電離の棚 (ledge) と、780 kHzにあるE層ピークに対応して、それぞれ吸収量のピークが生じている。E層を突き抜けてから約4 MHzまでの間の漸次吸収の減少する部分が、無偏倚吸収の近似の成立する領域である。吸収量は極小に達した後、F層の臨界周波数に近づくにつれ、ふたたび増加する。この領域が偏倚吸収に相当する。仰角が小さくなるにつれ、上述の各臨界周波数は高周波側に移行するが、吸収変化の様相は本質的に何ら変りはない。

次に図3(b)についてのべる。E層臨界周波数520 kHzをこえると無偏倚の領域に入り、吸収は減少するが、中間層臨界周波数710 kHzで吸収は増加する。しかし中間層の高さでは、E層ピーク付近に比べて衝突回数は小さいので、吸収量の増加は少ない。したがって、あまり大きな尖り（中間層臨界周波数での吸収増加）を示さずにF層反射に移行する。

図3(c)の吸収変化は、大局的には図3(b)に似ている。しかし、E層および中間層の最大電子密度の高さが低い（図1参照）ので、吸収量は全般的にかなり大きい。このプロファイルは、大きな地磁気じょう乱時におけるものであるから、すでに知られている地磁気嵐と電

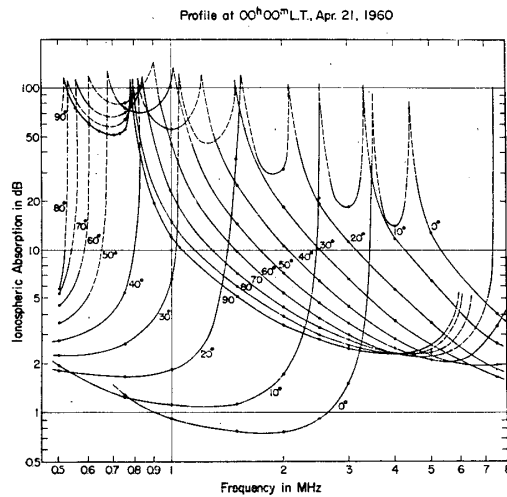


図 3 (a) プロファイル Q に対して計算した電離層吸収の変化

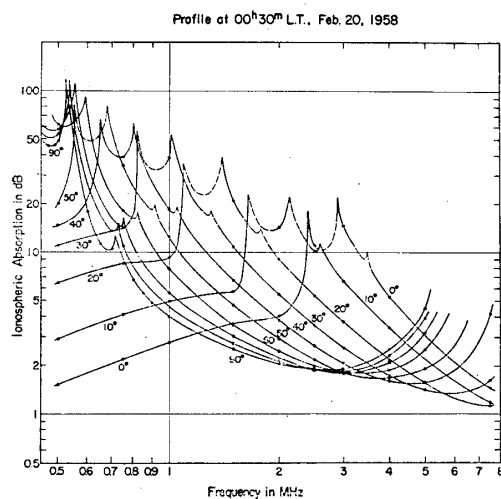


図 3 (b) プロファイル M に対して計算した電離層吸収の変化

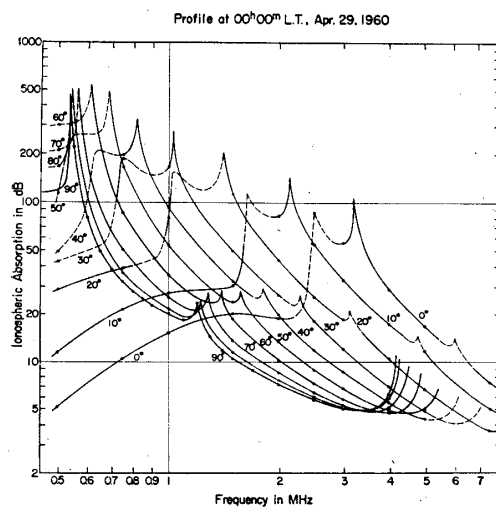


図 3 (c) プロファイル D に対して計算した電離層吸収の変化

波吸収の増加との関連 (HIRAO *et al.*, 1965) とも一致して興味深い。

#### 4. 南極観測船上短波電界強度測定結果の検討

上述の3つの典型的な夜間の  $N(h)$  プロファイルに対して求めた電波通路と電離層吸収の計算値が、すでに第I部および第II部でのべた、南極観測船上で測定された電界強度の実測値をどの程度説明できるかについて議論する。

両者の比較をするためには、図2および図3から2.5と5 MHzの計算値を取り出して、地表距離に対する電界強度または電離層吸収の変化に換算することが必要である。

第I部において使用した受信電界強度  $E_r$  を与える基本式は、

$$E_r = E_o + P_t + G_{ta} - L_d - L_i - L_g,$$

ここで、

$E_o$  は基準電界強度、 $P_t$  は送信電力利得、 $G_{ta}$  は送信アンテナ利得、 $L_d$  は通路長伝送損失、 $L_i$  は電離層吸収損失、 $L_g$  は大地反射損失である。

船上電界強度測定により得られた  $E_r$  から  $L_i$  を求めるのが第I部での目的であったのに反し、ray-tracingにより計算した  $L_d$  と  $L_i$  から  $E_r$  を求め、実測された  $E_r$  と比較検討するのが本節での目的である。その際、 $E_o$ 、 $P_t$ 、 $G_{ta}$ 、 $L_g$  は第I部で使用した値を適用する。

まず  $L_i$  と  $L_g$  を含まない無減衰電界強度  $E_u (E_o + P_t + G_{ta} - L_d)$  の地表距離に対する変化を、3つのプロファイルについてそれぞれ図4(a), (b), (c)に示す。2.5 MHzにおいては、前述したように、仰角(図中の数字)によって反射モードが変わるので、 $E_u$  は多少複雑に変化する。たとえば、図4(a)と(c)にみられるような曲線の折りかえしは、低仰角側がE層反射、高仰角側がF層反射モードに対応する。この反射モードと仰角の関係は、すでに図2または図3によって説明した。

無減衰強度に限らず、後述する電離層吸収の距離特性の計算においても、2回反射以上のモードに対しては、1回反射のくり返しとして求めた。

5 MHzにおいては、ほとんど全部がF層反射モードであるから、仰角の増加につれて  $L_d$  は単調な減少を示し、したがって、 $E_u$  はアンテナ指向性によく似た形で変化する。

これらの  $E_u$  曲線群を第I部図7の一定反射高(250 km)を仮定しての  $E_u$  曲線群と比較すると、5 MHzにおいては当然のことながら非常によくあっている。これに反し、2.5 MHzにおいては、最大到達距離が反射モードの相違よりかなり異なる。しかし、各回  $E_u$  曲線の上縁を連ねた合成無減衰曲線は、図4(a), (b), (c)相互だけでなく、第I部で用いた最終的  $E_u$  曲線ともほぼ完全に一致している。以上のことから、第I部で電離層吸収算出の基準と



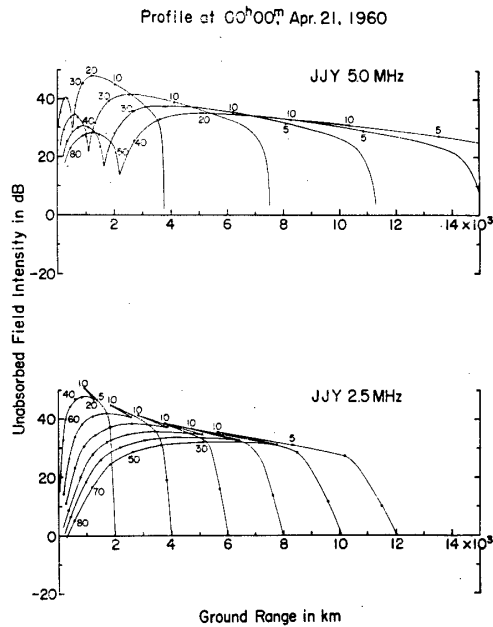


図 4 (a) プロファイル Q に対して, JJY 5 と 2.5 MHz の諸量を与えて計算した無減衰電界強度(図中の数字は発射角度)

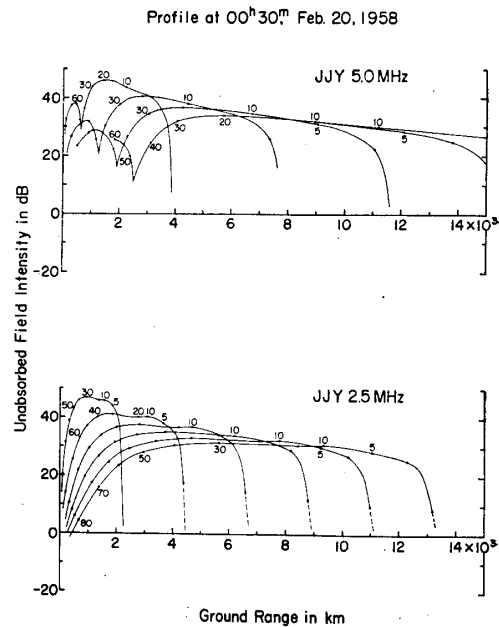


図 4 (b) プロファイル M に対して, JJY 5 と 2.5 MHz の諸量を与えて計算した無減衰電界強度(図中の数字は発射角度)

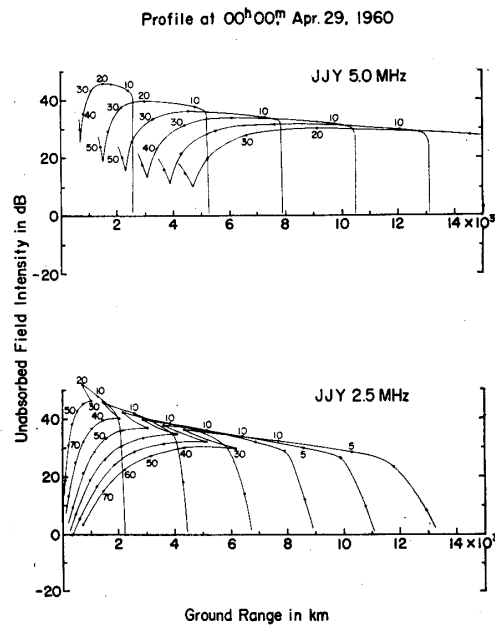


図 4 (c) プロファイル D に対して, JJY 5 と 2.5 MHz の諸量を与えて計算した無減衰電界強度 (図中の数字は発射角度)

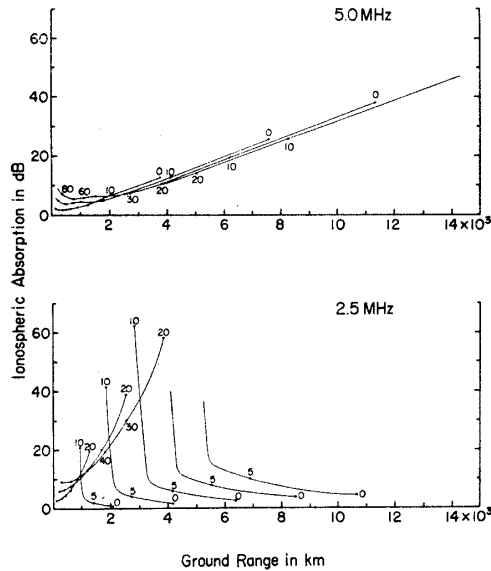
Profile at 00<sup>h</sup>00<sup>m</sup> Apr. 21, 1960

図 5 (a) プロファイル Q に対して計算した 5 と 2.5 MHz における電離層吸収量の距離特性 (図中の数字は発射角度)

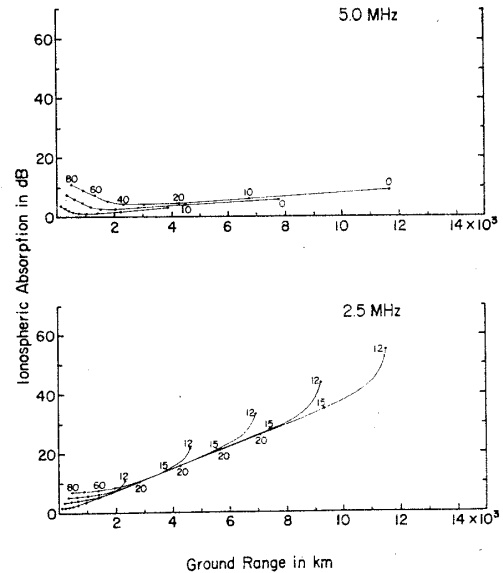
Profile at 00<sup>h</sup>30<sup>m</sup> Feb. 20, 1958

図 5 (b) プロファイル M に対して計算した 5 と 2.5 MHz における電離層吸収量の距離特性 (図中の数字は発射角度)

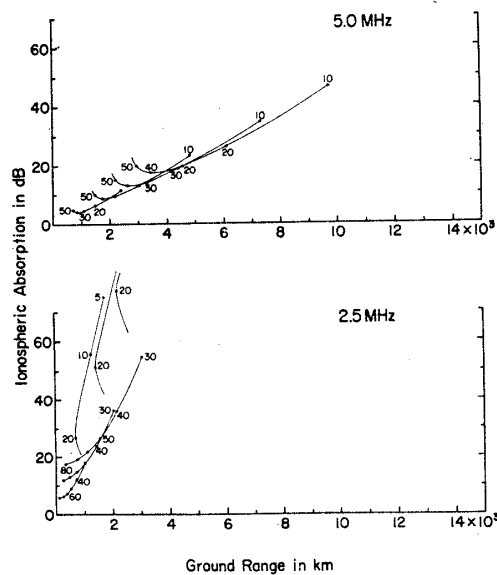
Profile at 00<sup>h</sup>00<sup>m</sup> Apr. 29, 1960

図 5 (c) プロファイル D に対して計算した 5 と 2.5 MHz における電離層吸収量の距離特性 (図中の数字は発射角度)

した,  $E_u$  曲線の設定が正しかったことが, 本文の計算から確かめられた.

次に図4と同様な表示方法で, 電離層吸収の変化を図5に示した. 図5(a)の2.5 MHzでは, 非常に  $L_i$  の少ないE層反射が卓越しているために, 複雑な様相を呈する. これに反して, 図5(b)では, 電波がE層内部に侵入するため(E層臨界周波数が小さいため), 受ける吸収も大きく, したがって, F層モードよりE層モードの  $L_i$  が大きくなり, 総合的には距離に応じて一様に  $L_i$  が増加する形をとる. 図5(c)の場合には, 電離が低い高度で増加しているので, E層モードの吸収は特に大きく, F層モードさえも大きな吸収をうけている.

図5の  $L_i$  に  $L_g$  を加えた結果を, 図4から求めた  $E_u$  から差し引くと, 受信電界強度  $E_r$  が求められる. 図6には  $E_u$  と, プロファイル Q, M, D に対して計算した  $E_r$  とを示した.

図6のプロファイル Q に対する2.5 MHz電波の電界強度を決定しているのは, 吸収の少ないE層反射であって, EとF反射および反射回数の移り変りの部分で強度の不連続がみられる(計算は理想化してあるので, 実際にはこのような不連続は現われない)ものの, 最も吸収が少なく, 遠距離に至っている. ところが, 5 MHz では2.5 MHz よりも強度の低下が大きい. このような傾向は無偏倚吸収の仮定からは期待できないことであって, 前述したように伝搬モードの相違により生じた現象である.

プロファイル M の場合には, 2.5 MHz でもF層反射モードが主体となって  $E_r$  を決定している, 5 MHz より吸収量も大きく, ほぼ無偏倚吸収の量的関係を満足している.

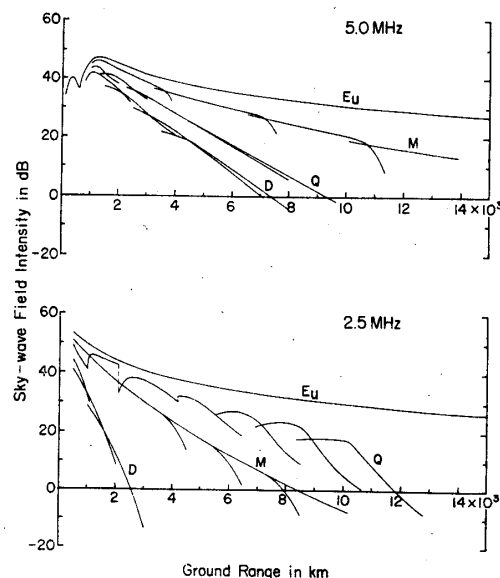


図6 JJY5と2.5 MHz電波がプロファイル Q, M, Dに入射した時期待される空間波の受信電界強度,  $E_u$ は無減衰曲線

プロファイル D の場合にも、共に F 層反射モードが主体になるが、吸収が大きいため電界強度の距離に対する低下の割合は非常に大きい。

以上の結果を総合すると、5 MHz においては、F 層反射モードによる無偏倚吸収の取り扱いほとんどすべての場合に正しいが、2.5 MHz では E 層反射も考慮しなければならない。しかし、E 層反射モードでも、E 層の高さと最大電子密度によっては、プロファイル Q の例のように吸収の少ない場合も、また M のように多い場合もありうる。実際には、各反射点において電離層の状態は異なるので、このような吸収量の異なる各種のモードが混在し、統計的に距離に対するある減衰率を示すものであろう。船上観測における 2.5 MHz 測定値のばらつきの多い原因は、伝搬モードの変動によるものかもしれない。

図 6 に示した 3 つの計算例の中では、プロファイル M の場合が、中程度の地磁気嵐の影響が中間層の発生という形で現われているものの、全体の吸収特性を乱していないために、船上観測による実測値が示す傾向に最も近い。これに対して、プロファイル Q は 2.5 MHz で E 層モードが卓越している点で、またプロファイル D は大きなじょう乱現象による異常吸収をうけている点で、実測値とかなりくい違っている。しかしながら、ある時刻における電離層の状態をもとに計算した電界強度値が、数カ月をわたって広範な地域で測定された強度変化と、必ずしも一致する必要はないとも考えられる。

実測値と計算値の比較検討は、現段階では上述のような概括的な議論の域を出ることができないが、第 I 部と第 II 部では、異なる周波数での吸収量の関係から、吸収の原因を夜間 E 層に帰したのに比べ、本文では、理論計算値が観測値と矛盾しない妥当な吸収量を示したという観点から、夜間 E 層を吸収の原因と結論するものである。

## 5. 考 察

第 I 部における解析の目的は、南極観測船上において異なる周波数で測定した電波の電界強度が、無偏倚吸収の関係を保って距離と共に低下するという事実から、その原因を夜間 E 層に求め、夜間の電離層吸収の太陽活動度による影響を確立することにあった。そこで用いた電離層吸収を表わす式は

$$A = \frac{677.2 \cdot n(\sec \phi) I}{(f + f_H)^{1.98} + 10.2} \quad (1)$$

であり、これから導かれる 2.5, 5, 10 MHz に対する吸収量  $A_{2.5}$ ,  $A_5$ ,  $A_{10}$  の間の比は

$$\frac{A_{2.5}}{A_5} = 2.3, \quad \frac{A_5}{A_{10}} = 2.47 \quad (2)$$

となる (記号の説明は第 I 部参照).

しかしながら, 前節でのべたように, 本文の計算例では吸収の絶対値はともかく, 2.5 と 5 MHz 間の吸収量の比は, 図 5 から略算されるように, 同じ F 層反射モードで比較して, (2)式よりもかなり大きい (図 5 (a), (b), (c)において,  $A_{2.5}/A_5$  はそれぞれ約 3, 4.6, 3.8). このくい違いについて考察する.

(1)式は多量の測定データをもとに導かれた実験式であり, 特に式中の数値 10.2 (分子の 677.2 も付随して変る) は, 適用周波数の下限を 5 MHz から 3 MHz に拡張するために加えた補正である (LUCAS and HAYDON, 1966).

他方, 一般に使用される記号を用いて, 無偏倚吸収  $\Gamma_{NV}$  は次式のように書かれる (WAKAI, 1961).

$$\Gamma_{NV} = 8.7 \cdot \frac{4\pi e^2}{\epsilon mc} \cdot \frac{1}{\mu} \int \frac{N\nu}{(\omega + \omega_L)^2 + \nu^2} d\nu \quad (3)$$

無偏倚吸収の条件は,  $\mu \doteq 1$  であるから, (3)式から ( $\Gamma_{NV}$  を  $A$  とおきかえ,  $\nu^2$  を省略し,  $f_L = \frac{\omega_L}{2\pi} = 0.9 \text{ MHz}$  を与えて) は,

$$\frac{A_{2.5}}{A_5} = 3.0 \quad (4)$$

が得られる.

これらに対して, 図 3 に示したような吸収計算値から, 2.5 と 5 MHz の吸収量の比をとってみると, 発射角によって約 3~5.5 の間で変化する. 本文中の図 3 の説明において, E 層臨界周波数をこえて吸収が周波数と共に減少する部分を無偏倚領域とのべた. しかし, E 層を突き抜けた直後では, 吸収は  $1/(f+f_H)^2$  の関係よりも急速に周波数の増加と共に減少する. すなわち, E 層臨界周波数をこえた近傍では, 厳密な意味で無偏倚の近似 ( $\mu \doteq 1$ ) は成り立たない.

以上を要約すると, 理論計算値 (図 3 および図 5) から考えて, (3)式から求められる近似値(4)式は, 周波数と発射角によってはそのまま適用できないことを考慮すべきである. 一方 実際問題としては, 2.5 MHz では E 層と F 層反射モードが混在し, その合成としてある電界強度が観測されるのであって, 現在のところ, (1)式の有効性を疑う事実は現われていないと考える.

このように, 2.5 MHz では, たとえ F 層反射モードであっても, 無偏倚吸収として扱えない場合がある. しかし, E 層の最大電子密度から考えて, 5 MHz においては,  $\mu \doteq 1$  の条件は満足されるであろうから, 異なる周波数での吸収量を比較する場合には,  $A_{2.5}/A_5$  より

も、 $A_5/A_{10}$ の方が適当な場合もある。ただしこの際、 $A_{10}$ への偏倚吸収の混入には注意を要する必要がある。

最後に  $E_s$  層反射の果す役割について一考する。図6中プロファイル Q の 2.5 MHz では、電離層吸収の非常に少ない E 層モードが卓越し、遠距離まで高い電界強度を示した。これはそのまま  $E_s$  反射モードに適用できそうである。むしろ  $E_s$  層は透過性があることによって、一部のエネルギーは F 層反射に転化されるし、その上全反射点において  $E_s$  反射が期待できる確率は、夜間 E 層に比べてはるかに小さい。したがって、プロファイル Q の計算例は、 $E_s$  反射モードを仮定したとしても、電界強度の最大値を与えることになる。5 MHz においては、 $E_s$  層反射のもつ意義は更に小さくなる。定性的ではあるが、夜間の遠距離伝搬にあたって、 $E_s$  反射は全体の吸収特性に大きな影響を及ぼさないと考えられる。

## 6. 結 論

夜間のモデル電離層に電波を投射した時の計算結果から、発射仰角および周波数による伝搬モードおよび吸収量の変化の様相が明らかになった。特に約 2.5 MHz 以下の周波数において変化が著しい。

吸収計算値は実測値を十分に説明したとはいえない。しかし、夜間 E 層が量的に妥当な吸収を与えることが明らかになった。

## 謝 辞

電波通路と吸収の計算にあたって、全般的な支援を頂いた NOAA の R. W. KNECHT 氏、有益な助言を頂いた K. DAVIES 博士、プログラムの使用と計算の便宜を計って頂いた R. M. JONES 氏に対して厚くお礼申し上げる。

## 文 献

- HASELGROVE, J. (1954): Report of Conference on the Physics of the Ionosphere, Physical Society London, 355-364.
- HIRAO, K., N. WAKAI, K. SAWADA, T. HIKOSAKA, K. YANO, and K. MAEDA (1965): Some evidences of the particle effects on the ionosphere, Space Research V, North-Holland Publishing, Amsterdam.
- JONES, R. M. (1966): A three-dimensional ray tracing computer program. Envir. Sci. Serv. Adm., Tech. Rep., IER 17-ITSA 17.
- LUCAS, D. L. and G. W. HAYDON (1966): Predicting statistical performance indexes for high frequency ionospheric telecommunications systems. Envir. Sci. Serv. Adm., Tech. Rep., IER 1-

ITSA 1.

WAKAI, N. (1961): Non-deviative absorption at night. J. Rad. Res. Labs., 8, 213-218.

WAKAI, N. (1967): Quiet and disturbed structure and variations of the nighttime E region. J. Geophys. Res., 72, 4507-4517.

若井 登・大瀬正美・田之畑一男 (1971): 夜間の電離層吸収, I. 第 2-8 次南極観測船上短波電界強度測定. 南極資料, 39, 1-18.

若井 登・藤井 周・宮本善行 (1971): 夜間の電離層吸収, II. 狭帯域受信機による南極観測船上電界強度測定. 南極資料, 41, 1-9.

WAKAI, N. (1971): to be published in J. Rad. Res. Labs.

(1971年 3 月 5 日受理)